BIOCARVÃO NO SOLO: ASPECTOS AGRONÔMICOS E AMBIENTAIS

Fabiano André Petter[1], Larissa Borges de Lima[1], Marina Moura Morales[2], Ben Hur Marimon Júnior[3] e Leidimar Alves de Morais[4]

[1]Professor e Pesquisador da Universidade Federal de Mato Grosso-UFMT campus de Sinop-MT
[2]Pesquisadora da Embrapa Florestas
[3]Professor e Pesquisador da Universidade do Estado de Mato Grosso-UNEMAT
[4]Estudante do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFMT campus de Sinop-MT

Resumo: Embora a prática do uso do carvão vegetal no solo visando a melhoria do desenvolvimento das plantas seja milenar, pouco se sabe sobre os efeitos técnicos de sua aplicação, sobretudo em longo prazo. Assim, tendo as terras pretas de índio (TPIs) como modelo de sustentabilidade do solo em função da presença de carbono pirogênico (C-pyr), na última década os estudos acerca do uso de materiais ricos nessa forma de carbono (biocarvão) se intensificaram. Diversos estudos têm abordado os efeitos da aplicação de biocarvão no solo e seus efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, sobre a matéria orgânica, ciclos biogeoquímicos do carbono, desempenho agronômico de culturas anuais, espécies florestais, olerículas, emissão de gases de efeito estufa (N_2O, CO_2 e CH_4) e mais recentemente os efeitos sobre a dinâmica de pesticidas no solo. Nesse sentido, esse trabalho aborda algumas características do uso do biocarvão no solo, com enfoque na sua produção, matéria prima, características físicas e químicas, aspectos agronômicos e ambientais do uso em solos e como substratos agrícolas.

Palavras-chave: carbono pirogênico, sequestro de carbono, GEE, fertilidade, produtividade.

Abstract: Although the practice of using charcoal in soil to improve plant development is ancient, there is a lack of information about the technical effects in soil, especially in long term. The dark earth or Terra Preta de Indio (TPIs) as soil sustainability model due to the presence of pyrogenic carbon (C-pyr) in the last decade studies on use of rich materials in this form of carbon (biochar) intensified . Several studies have addressed the effects of biochar application in soil and its effects on physical, chemical and biological soil characyteristics, carbon biogeochemical cycles, agronomic performance on annual crops, forest species, olerículas, gas emissions greenhouse (N_2O, CO_2 and CH_4) and more recently, the effects on dynamics of pesticides in soil. In this sense, this work addresses biochar use in soil, focusing on it prduction, raw material, physical and chemical characteristics, agronomic and environmental aspects of its use in soils and agricultural substrates.

Key Word: Black carbon, carbon sequestration, GHG, fertility and productivity.

Introdução

A intensificação da produção agrícola em grande escala tem assegurado o suprimento de alimentos a uma população que cresce exponencialmente. A ação antrópica para produzir alimentos tem gerado em algumas ocasiões conflitos entre a cadeia produtiva e alguns setores da sociedade, que na maioria das vezes é representada por organizações. Devido o crescimento populacional, aumentou-se a demanda por alimentos e, consequentemente, as áreas a serem cultivadas. Contudo, em muitos casos essa intensa ação antrópica tem gerado degradação do meio ambiente, incluindo o extrativismo vegetal, devido à falta de planejamento.

O crescimento da área agricultável, frequentemente ocorre em áreas de reserva e preservação, onde a derrubada e queima da mata ocasiona perda da fertilidade natural do solo, diminuição da matéria orgânica do solo e liberação de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global. Extensas áreas de pastagens degradadas poderiam ser utilizadas para o fim de se produzir alimentos, contudo devido à baixa fertilidade desses solos, tem se preferido abrir novas áreas. Nos solos de cerrado, como os Latossolos, Neossolos, Argissolos, na maioria das vezes a fertilidade do solo restringe-se a camada mais superficial do solo e a perda de matéria orgânica (M.O.) dessa camada reduz o potencial produtivo desses solos.

A matéria orgânica é de grande importância para as propriedades químicas e físicas dos solos de cerrado, contribuindo em até 80% da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (Pacheco e Petter, 2011). Entretanto, nesse bioma a taxa de mineralização da M.O. atinge altos níveis na decomposição, em razão da elevada temperatura e atividade microbiológica, reduzindo a quantidade desses compostos no solo (Torres et al., 2005). Diante disso, a incorporação de matéria orgânica e a manutenção dos seus níveis no solo contribuem para a fixação de carbono e redução do efeito estufa e, não menos importante, para a manutenção da fertilidade.

Uma forma de incorporar e manter os níveis de matéria orgânica no solo é a adição do produto da carbonização de material orgânico de forma sustentável, comumente chamado de biocarvão (BC). A biodegradação do BC no solo é um processo relativamente lento que resulta na mobilização do carbono e na alteração das propriedades da superfície do carvão.

Dois aspectos sobre a aplicação do BC em solo são valiosos, estabilidade em relação à decomposição e sua habilidade superior em reter nutrientes, levando aos benefícios ambientais anteriormente citados. (Lehmann, 2007).

O uso do biocarvão pode ser uma alternativa para o aumento da produção de biomassa e de grãos em áreas de pastagens degradadas, diminuindo assim o aumento do plantio em áreas de reserva e preservação. Devido a algumas características do carvão como, reatividade, tempo de degradação, estrutura química da molécula, a qual apresenta uma estrutura basicamente aromática, superfície especifica grande, hidrofobicidade entre outras, faz com que este material seja considerado relativamente inerte no solo e de alta estabilidade, o que pode contribuir para a melhoria das características químicas, físico-hídricas e consequentemente biológicas (Cunha et al., 2009). Essa contribuição pode aumentar a produtividade das culturas, resultando em uma maior liquidez para o agricultor, aumento da recuperação das áreas degradadas, utilização eficiente da água e solo e uma preservação da biodiversidade dos nossos ecossistemas.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

O biocarvão aplicado no solo carrega o nome de biocarvão não somente pelos benefícios ao solo e ao meio ambiente, mas também pela forma com que é produzido. O BC é oriundo de processos de queima controlado de materiais orgânicos, geralmente resíduos (ex. casca de arroz, serragem e torta de filtro), com a mínima liberação do CO_2 e outros gases (condensáveis e não condensáveis) para a atmosfera, utilizando-se fornos/reatores apropriados para tal finalidade.

Já existem hoje sistemas fechados e controlados (Figura 1) que permitem a captura e o aproveitamento de subprodutos gerados na carbonização, minimizando assim o efeito maléfico ao meio ambiente.



Figura 1 - Reator horizontal com capacidade máxima de 10 Mg dia^{-1}, da empresa SP Pesquisa e Tecnologia Ltda, localizada em Mogi Mirim- SP.

Atualmente, os resíduos mencionados estão sendo utilizados, através de queima, para a geração de energia térmica, elétrica, na secagem de grãos ou para e são passíveis à obtenção de crédito de carbono dentro dos padrões do Protocolo de Quioto.

Biocarvão no solo

Na maioria dos solos, principalmente em solos de cerrado são encontrados pequenos fragmentos de carvão vegetal, uma forma de C-pyr ou *black carbon*, resultante de queimas naturais ou da ação do homem (Petter, 2010). Embora os carvões sejam reportados como materiais pouco reativos (inertes) e hidrofóbicos, devido à sua porosidade, apresentam elevada área superficial (200 m^2 g^{-1} - 400 m^2 g^{-1}) (Kishimoto e Sugira, 1985) conferindo muitas vezes elevada reatividade. A reatividade e a hidrofobicidade dos carvões dependem, assim como sua estrutura, do material de origem e das condições de sua formação como, o tipo de processo térmico, a temperatura, tempo de queima, umidade e granulometria do material vegetal, disponibilidade de oxigênio, entre outros.

No solo, o C-pyr é uma das frações com a maior meia vida dentre todas as frações contendo carbono (Pessenda et al., 2004). Frações contendo C-pyr são encontradas nas Terras Pretas de Índio na Amazônia em grandes quantidades e com idades definidas através do método de radiocarbono que variam de 500-7000 anos (Neves et al., 2003). Nesse sentido, fica evidente a longevidade desse material no solo, no entanto, a taxa quantitativa de decomposição ainda precisa ser avaliada com metodologias que forneçam dados mais precisos.

O entendimento da decomposição do C-pyr no solo é de fundamental importância para o uso como condicionador de solo, visando o sequestro de carbono da atmosfera. A permanência no solo sem sofrer, em curto prazo, alterações em sua estrutura pode contribuir para a diminuição da emissão de CO_2. Segundo Wardle et al. (2008) após a incorporação de C-pyr oriundo de floresta tropical, não se verificou perdas de massa nos primeiros dez anos, enquanto que Brodowski (2004) relatou perdas de 16% e 51% para carbono de biomassa não carbonizada oriundo de milho e centeio respectivamente. Esses dados comprovam que a perda de carbono da biomassa de plantas não carbonizadas e produzidas em ambientes oxidativos é maior, contribuindo para a diminuição do tempo de permanência do carbono no solo considerando-se o ciclo global do mesmo, o que implica em maior taxa de emissão de CO_2 para a atmosfera. Contudo, a degradação e emissão de carbono de forma mais lenta se faz necessária do ponto de vista ambiental.

A biomassa carbonizada, entretanto, também sofre alterações e decomposição no solo, embora numa taxa muito menor. A degradação do carvão faz com que esse material também faça parte do ciclo global do carbono. Do contrário, implicaria no acúmulo de C nessa forma em grandes quantidades na superfície da terra em menos de mil séculos (Kuhlbusch & Crutzen, 1995; Glaser et al., 2002).

Produção de carvão vegetal

O domínio do fogo, pela combustão direta da madeira, deu ao homem os primeiros passos para o seu desenvolvimento, proporcionou melhor qualidade de vida com a confecção de utensílios e ferramentas, aumentou o

leque de opções dos alimentos, além de preservá-los por mais tempo via cocção, deu conforto térmico nos dias de frio e segurança nas noites escuras, conferindo a lenha como combustível mais antigo da humanidade.

Entre os processos de conversão da madeira em energia, o mais clássico é a carbonização. Nos primórdios a madeira era queimada em ambientes fechados, se tornava preta e friável produzindo um combustível com menos fumaça, sem chama e calor mais intenso que a própria madeira. Começou-se assim, a produção de carvão vegetal para utilização como fonte de energia nas habitações (Juvilar, 1980).

Hoje, o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal no mundo, contribuindo com 38,5% da produção mundial, utilizando-se da pirólise lenta para alcançar este número. O conceito básico da pirólise é a degradação térmica da biomassa em ausência total ou quase total (relação ʎ= ar utilizado/ar para queima estequiométrica <0,2) de agente oxidante (Peacocke, Joseph, 200-?), havendo transformação em frações de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Pirólise lenta, ou convencional e também conhecida como carbonização, consiste na decomposição térmica da biomassa sob ação do calor, na presença de quantidades controladas de ar, gerando carvão vegetal, diferentes produtos químicos e combustíveis líquidos e gasosos. Esse processo é realizado a baixas taxas de aquecimento (1 ºC s^{-1}) e elevados tempos de residência, horas ou dias (Hayashi e Miura, 2004)

Basicamente, a pirólise lenta concentra o carbono e elimina o oxigênio, com consequente aumento do conteúdo energético do produto principal, o carvão vegetal. Por exemplo, um processo que parte da lenha de florestas energéticas (*Eucalyptus* sp.) com poder calorífico superior em torno de 4580 kcal kg^{-1} e em base seca 24% de carbono fixo, para carvão com poder calorífico médio de 7472 kcal kg^{-1} e carbono fixo de 84% (Pereira et al., 2000; Brito, 1978) .

O produto principal da pirólise lenta é o carvão vegetal, largamente usado para produção de energia. Entretanto, o produto também pode ser usado como sequestrador de carbono, fertilizante e condicionador do solo, sendo então conhecido como Biocarvão ou "*Biochar*" ou ainda, "*Agrichar*".

A fração gasosa da pirólise lenta é comumente recirculada dentro do próprio reator para manutenção da temperatura ou queimada, evitando emissão de gases poluidores. Já a fração líquida é dividida em duas fases; uma aquosa, que poder ser usada como pesticida e outra composta de óleo secundário ou alcatrão, que pode ser usado como combustível, entretanto, seu uso ainda é restrito para queima em turbinas e caldeiras modificadas para este fim, devido à corrosividade (Briens et al., 2008).

A quantidade de biocarvão produzido pela queima depende do material de origem, da temperatura e tempo de queima. Durante a pirólise do material vegetal, uma grande quantidade de massa é perdida principalmente na forma de compostos orgânicos voláteis (CO, CO_2, CH_4) e H_2O resultando em uma redução considerável do volume inicial (Downie et al., 2009). Quanto mais alta for a temperatura (> 700 °C) de carbonização maior será a perda de C na forma de compostos voláteis, uma vez que compostos vegetais tais como hemicelulose, celulose e lignina são degradados. Segundo Sjöström (1993), a hemicelulose é degradada em temperaturas de 200-260 °C, celulose 240-350 °C e lignina entre 280-500 °C.

Trompowsky et al. (2005), em condições controladas, demonstraram que duas espécies de eucalipto (*E. saligna* e *E. grandis*) tiveram uma máxima produção de carvão, chegando a 56%, a temperatura de carbonização de 300°C. Nesse mesmo estudo, também, se observou que a razão O/C era maior (0,3) para a temperatura de 300°C e, com o aumento da temperatura até 500°C, essa razão diminuiu para 0,06, resultando num material que continha carbono em 90% da sua massa. A presença de oxigênio numa maior proporção pode indicar maior reatividade do carvão analisado.

O carbono orgânico contido no biocarvão com foco agrícola (biochar) é constituído em sua maior parte de estruturas aromáticas policondensadas, caracterizadas pela ligação em forma de anel benzênico de átomos de C com oxigênio (O) ou hidrogênio (H) (Lehman & Joseph, 2009). Essas ligações entre C-O e C-H governam as estruturas aromáticas estáveis do biocarvão, sendo utilizadas para medir o grau de aromaticidade dos compostos (Braadbaart et al., 2004; Hammes et al., 2006). Geralmente razões O/C abaixo de 0,3 indicam alto grau de aromaticidade (Baldock e Smernick, 2002), o que corrobora com a premissa de se carbonizar a matéria prima em ambiente com baixas concentrações de oxigênio, para se obter um biocarvão com alta concentração de C.

Propriedades físicas e organoquímicas do biocarvão

A temperatura de carbonização é o fator que mais exerce influência sobre as propriedades físicas do biocarvão (Trompowsky et al., 2005). A combustão da madeira leva a uma perda de massa em volume na forma de compostos voláteis, que incluem a perda do "suco celular", hemicelulose, celulose e lignina, formando compostos com alto teor de carbono (Downie et al., 2009). Com a perda desses compostos há formação de macro, meso e microporos, que contribuem para o aumento da área de superfície específica do biocarvão (Figura 2). Geralmente a área de superfície específica do biocarvão aumenta com o aumento de temperatura até certo ponto (Brown et al., 2006), todavia em altas temperaturas (>1000 °C) essas pilhas grafitadas sofrem um "derretimento", uma espécie de fusão, visto que os compostos aromáticos a essa temperatura são degradados, e consequentemente perda de carbono e atributos físicos desejáveis, como a porosidade.

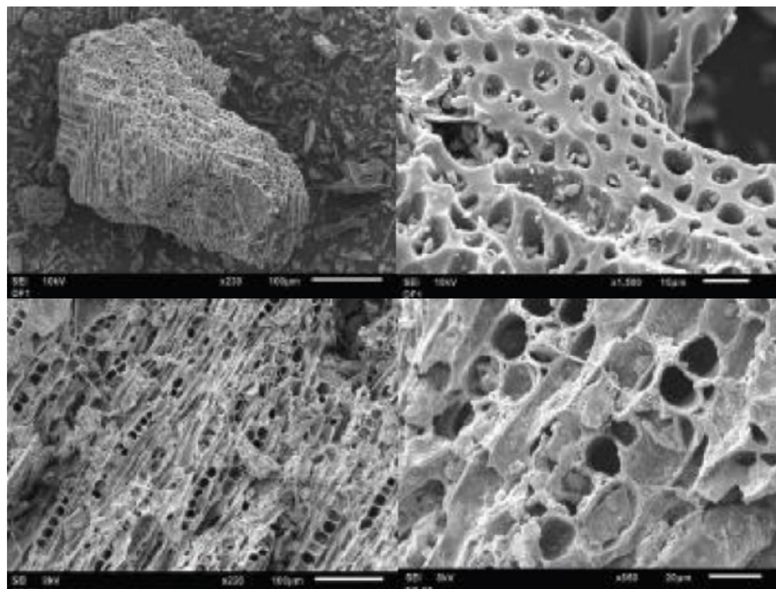


Figura 2. Imagem de alta resolução de biocarvão de madeira de eucalipto aplicado em um Plintossolo Haplico no cerrado. Fonte: Carvalho et al. (2014).

O biocarvão em um primeiro momento pode ser recalcitrante devido o preenchimento dos espaços porosos por compostos condensados de alcatrão e outros produtos da decomposição, no entanto, com o aquecimento esses compostos tornam-se voláteis e liberam os espaços porosos.

A densidade do biocarvão também é uma característica física importante. A massa específica de biocarvão feito a partir de diferentes tipos de madeiras transformadas em diferentes tipos de fornos tradicionais geralmente varia de 0,45 g cm^{-3} a 0,30 g cm^{-3} (Pastor-Villegas et al., 2006). A porosidade do biocarvão é responsável pela maior parte das superfícies de cargas reativas (Petter e Madari, 2012). Estas estruturas periféricas reativas podem ser hidrofílicas, hidrofóbicas, altamente ou parcialmente reativas, sendo essa variação em função da eletronegatividade de grupos funcionais que se ligam ao carbono das estruturas aromáticas policondensadas, tais como OH, NH_2, OR, ou O (C=O)R, o que gera uma heterogeneidade química de superfície (Brennan et al., 2001). As características físicas e químicas do biocarvão como a porosidade, área de superfície específica e cargas eletroquímicas estão intimamente relacionadas com a temperatura de carbonização e das concentrações de O_2 (Petter e Madari, 2012).

Biocarvão: aspectos agronômicos

Os solos apresentam características próprias distintas quando relacionados com suas propriedades químicas, físicas e biológicas, dependendo da natureza do mineral, da matéria orgânica e da forma com que estes estão associados (Brady & Weil, 2008). No entanto, quando materiais com características distintas estão presentes pode-se ter mudanças no comportamento desse solo, alterando as características anteriormente citadas. A presença de biocarvão pode contribuir para mudanças significativas nas propriedades físicas do solo, alterando as características do mesmo tais como: estrutura, porosidade e consistência, diâmetro dos poros, distribuição granulométrica, densidade, em função de sua maior área superficial específica (Downie et al., 2009).

O biocarvão, devido à sua porosidade e, consequentemente, a sua alta superfície específica, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, sobretudo em solos de textura arenosa. Esse efeito foi verificado por Carvalho et al. (2014) com a aplicação de biocarvão em um Plintossolo Háplico de textura arenosa. Esses autores verificaram aumento na capacidade de retenção de água no solo, com aumento de 0,8 a 1% na água disponível para as plantas a cada Mg ha^{-1} de biocarvão aplicado. Todas essas alterações nas propriedades físicas podem levar a mudanças em outras propriedades do solo, principalmente químicas e biológicas, em função do surgimento de sítios quimicamente reativos e habitats de proteção para microrganismos do solo (Brady e Weil, 2008).

A área de superfície específica de um solo é uma característica extremamente importante, influenciando na fertilidade. A área de superfície específica do biocarvão que pode chegar a 400 m^2 g^{-1} é comparável a da argila e superior a da areia. Tais parâmetros levam a hipótese de que a presença do biocarvão em solos arenosos pode suprir de certa forma a baixa capacidade de troca catiônica (Liang et al., 2006) disponibilidade de nutrientes e atividade de microrganismos.

A capacidade de troca catiônica está relacionada á área de superfície específica, mas é altamente dependente de sítios quimicamente reativos. No caso do biocarvão, esses sítios vão se formando ao longo dos anos ao passo que as partículas são atacadas por microrganismos no solo, alterando as características químicas e físicas de superfície (Cohen-Ofri et al., 2006). Essas alterações segundo estes autores, se dão pelo aumento de cargas elétricas oriundas da oxidação dos compostos bioquímicos, levando a um aumento no número de compostos fenólicos, hidroxílicos, carbonilicos e quinonas e, consequentemente, a um aumento no número de cargas negativas resultante da substituição pelas cargas positivas no processo de oxidação. Talvez aí esteja em parte a explicação do aumento da CTC do biocarvão com o passar dos anos em solos que contem esse material.

No Brasil, exemplo do efeito benéfico do carvão (ou C-pyr) para a fertilidade dos solos tropicais são os solos chamados de terra preta de índio (ou terra preta arqueológica), que são solos antrópicos dos povos pré-colombianos da Bacia Amazônica (Kampf e Kern, 2005). Esses solos contêm elevado teor de C-pyr que chega a ser 2,5 vezes maior que o teor desse material em solos adjacentes não antrópicos. Esse efeito benéfico do carvão citado anteriormente levou, provavelmente, centenas de anos para ser consolidado, devido principalmente ao tamanho das partículas de carvão adicionadas ao solo e o tempo de atividade que processos abióticos e bióticos do solo levaram para oxidarem esse material, gerando as características desejáveis, hoje atenuadas, ao mesmo.

Partindo da premissa dos benefícios proporcionados às terras pretas de índio com a presença de C-pyr, Petter et al. (2016) verificaram aumento da reatividade da fração húmica do solo, sendo tal efeito atribuído à oxidação parcial das estruturas aromáticas policondensadas do biocarvão aplicado. O aumento das cargas de superfície podem alterar a dinâmica de retenção e disponibilidade de nutrientes no solo, como verificado por Petter et al. (2012). Esses autores verificaram benefícios positivos com a aplicação de biocarvão em um solo de cerrado, com aumento na disponibilidade de Ca, P e K e redução nos teores de acidez potencial (H+Al).

Durante a degradação abiótica e biótica do biocarvão no solo, há uma tendência de aumentar a atividade microbiana sobre o mesmo e consequentemente do solo. Apesar de inicialmente a degradação abiótica ser a principal responsável, esta pode contribuir de imediato para o aumento da atividade microbiana, através do aumento de habitat favoráveis e protegidos (Hammes e Schimdt, 2009). Hamer et al. (2004) investigaram o "priming" interativo de carbono pirogênico e a mineralização de glicose. Segundo esses autores, a mineralização do carbono pirogênico foi estimulada por adição de glicose no solo, ao passo que, a mineralização da glicose foi estimulada pela presença do C-pyr. Os autores propuseram que o efeito do material carbonizado ocorreu em razão da maior área superficial para o crescimento e atividade microbiana e não pela disponibilidade de maior quantidade de carbono, pois o C-pyr sendo altamente aromático, não é prontamente acessível para a microbiota como fonte de energia.

Esse efeito foi verificado por Machado (2012) coma aplicação de biocarvão em um Latossolo de cerrado, onde se observou maior atividade microbiana (respiração microbiana), entretanto não se observou efeito significativo para o carbono da biomassa microbiana, justificando assim, a indisponibilidade imediata de C-pyr para a microbiota do solo. Contudo, durante o processo de pirólise há também a formação de formas mais lábeis de carbono, sendo este prontamente disponível para os microrganismo do solo, caso contrário, poderia haver um efeito de estresse da microbiota do solo em função do aumento do quociente metabólico (qCO_2). Esses resultados são importantes à medida que se esperava uma elevada atividade microbiana não acompanhada de aumento do carbono da biomassa, que em longo prazo em razão da elevada relação C/N e estabilidade molecular do biocarvão poderiam ocasionar sérios danos a microbiota do solo.

Outro efeito do biocarvão aplicado ao solo está relacionado aos teores de C nas frações das substancias húmicas. As substâncias húmicas são um conjunto de moléculas que possuem massa molar variável, coloração de amarelada a preta e solubilidades diferenciadas em meios alcalino e ácido (Stevenson, 1994). Em grande parte, são formados por reações secundárias de síntese e assim, organismos vivos não as produzem diretamente. As substâncias húmicas distinguem-se no solo ou em sedimentos em razão de apresentarem características diferentes dos compostos que lhes deram origem, sejam eles originados de biopolímeros de microrganismos ou de plantas, ou de processos de síntese e ressíntese mediados pelos organismos decompositores do solo.

As substâncias húmicas nas Terras Pretas de Índio apresentam algumas características diferentes daquelas encontrados em solos não antrópicos, e isso são uma das razões para maior potencial de fertilidade desses solos (Cunha, 2005; Cunha et al., 2007). Nesse sentido, alguns estudos (Lima, 2014; Petter et al. 2016) foram conduzidos a fim de investigar se a adição de biocarvão ao solo poderia ter efeito nas substâncias húmicas, isto é, em que nível esse efeito se manifesta nos teores de C das substâncias húmicas, ou seja, a proporção das três frações principais (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina) ou também na composição molecular dessas frações (grupos funcionais). Verificou-se que o biocarvão em solos de cerrado proporciona aumento nos teores de C principalmente na fração humina, com aumento da reatividade nas frações ácido húmico e humina. Do ponto de vista do sequestro de carbono, esses resultados são importantes, visto que há um aumento do C em uma das frações mais estáveis da matéria orgânica do solo.

Importante destacar que os ácidos húmicos estão entre as frações mais importantes da matéria orgânica, e tem papel fundamental na sustentabilidade das funções do solo. A maior parte das substâncias húmicas representa um compartimento da matéria orgânica que tem uma lenta taxa de transformação e degradação, ou é recalcitrante, e compõem 70-80% da matéria orgânica (Stevenson, 1994). Elas exercem papel importante na acumulação de carbono e na retenção e disponibilização de nutrientes para as plantas.

Outro potencial do biochar está no seu efeito no crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas e florestais, especialmente em solos tropicais, onde a matéria orgânica é essencial para a fertilidade do solo, devido ao alto grau de intemperização dos argilominerais que possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Nesses ambientes o manejo sustentável da matéria orgânica é de primordial importância. Sobre manejo sustentável podemos entender o aumento e manutenção de níveis adequados e a formação e manutenção da qualidade da matéria orgânica. Isso implica na incorporação e estabilização de material orgânico, além do aumento da CTC do solo. Com isso, a capacidade produtiva do solo potencialmente aumenta o que também implica em maior produção de biomassa e consequentemente maior re-incorporação de C novo no solo que, por sua vez, contribuirá para a manutenção da produtividade do solo, fechando assim um círculo "benéfico".

Na última década diversos estudos têm reportado os efeitos da aplicação de biocarvão sobre o desempenho agronômico de culturas. Madari et al. (2006) verificaram, em experimento em vasos, que o arroz de terras altas (cultivar Primavera) responde positivamente à aplicação de biocarvão (de *Eucalipto* sp.) em um solo já sob uso agrícola. Aumento na produtividade de arroz quando aplicado biocarvão junto com fertilizante também foi verificado por Steiner et al. (2007). Adicionalmente, Kimetu et al., (2008) demostraram efeito significativo na produtividade do arroz e outras

gramíneas com a aplicação de biocarvão vegetal ao solo. No Brasil, em solos de cerrado Petter (2010) e Petter et al. (2012) também verificaram efeito positivo da aplicação de biocarvão na cultura do arroz de terras altas e soja em dois solos diferentes, enquanto que, Zhang et al. (2012) verificaram efeito positivo do biocarvão sobre a cultura do milho. Ademais, os trabalhos com o uso do biocarvão na última década não ficaram restritos a estudos em grandes culturas, mas também em culturas florestais como os estudos no Brasil conduzidos por Souchie et al. (2011), Petter et al. (2012) e Farias et al. (2016).

Assim, o carvão vegetal, embora seja um material relativamente inerte e de alta estabilidade, dependendo das condições da sua formação e das transformações que passa no solo, tem a capacidade de contribuir para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, consequentemente aumentar o desempenho agronômico das culturas e demais espécies de interesse econômico e ambiental.

Biocarvão: aspectos ambientais

A aplicação de biocarvão no solo é proposta como um mecanismo de sequestro de carbono, pois através dessa prática espera-se evitar a emissão de carbono em forma de gases de efeito estufa sendo ele armazenado no solo em formas mais estáveis, comparado com a deposição de resíduos diretamente ao solo, em formas mais lábeis (Madari et al., 2006). Em uma tentativa de calcular o efeito da introdução de um mecanismo que adiciona biocarvão ao solo no lugar de simplesmente queimar a biomassa Lehmann et al. (2006) estimaram que até 12% da emissão antrópica de C, causada por mudança no uso da terra (0,21Pg C), poderiam ser eliminados aplicando-se o C no solo na forma de biomassa carbonizada.

A utilização de biocarvão no solo pode levar a uma maior fixação de carbono, devido sua superfície de cargas e pela alta estabilidade no solo (Madari et al., 2006) em função de seu efeito recalcitrante e sua natureza refratária (Steiner et al., 2006). Como já abordado anteriormente, essa permanência do C em estruturas aromáticas, como é o caso do biocarvão, por longos anos, leva ao efeito de retenção prolongada do C no solo. A alta superfície específica, grande quantidade de sítios quimicamente reativos, alta porosidade podem ainda contribuir para a redução das emissões de óxido nitroso (N_2O) do solo, principalmente dos provenientes de adubações nitrogenadas. De acordo com dados do IPCC (2007), a agricultura é considerada um dos setores da economia que mais contribui para as emissões de N_2O. Globalmente, estima-se que a agricultura é responsável por 80% das emissões de N_2O. No Brasil, este percentual é ainda maior devido à forte vocação nacional para a agricultura, onde se estima que 94% do N_2O liberado na atmosfera anualmente, são provenientes da agricultura, totalizando aproximadamente 480 Gg N_2O ano^{-1} (Cerri e Cerri, 2007). Rondon et al. (2006) verificaram redução na emissão de N_2O com aplicação de biocarvão nas doses de 20 Mg ha^{-1}. Esses autores verificaram efeito nos períodos iniciais após a aplicação. Clouch et al. (2010) e Alho et al. (2012) também verificaram redução nas emissões deN_2O com a aplicação de biochar.

No Brasil, recentemente, estudos também têm sido conduzidos para avaliar os efeitos do biocarvão sobre a dinâmica de pesticidas no solo. Petter et al. (2016a, 2016b) verificou aumento da sorção e redução da dessorção do herbicida diuron em solos de cerrado, reduzindo assim o potencial de lixiviação e consequentemente contaminação de águas subsuperficiais. De acordo com esses autores, a maior capacidade sortiva do solo com a aplicação de biochar pode ser atribuído a dois efeitos principais: um seria o efeito direto do biochar sobre os componentes da matéria orgânica (COT e HUM) e estes com o coeficiente de sorção (Kf), e, o outro seria o efeito direto na retenção do diuron através de cargas geradas pela oxidação das estruturas aromáticas policondensadas do biochar. Nesse sentido, Lima (2014) verificou através de análises espectroscópicas de FTIR e RMN que houve oxidação das estruturas aromáticas do biochar associado à AH e HUM, aumentando a reatividade (grupos carboxílicos C=O) dessas frações. Ainda de acordo com Petter et al. (2016a, 2016b), o aumento de grupos carboxílicos (C=O) nas frações AH e HUM com aplicação de biochar contribuiria com interações sortivas do diuron por meio de pontes de H, enquanto que, a maior aromaticidade do biochar-HUM estimularia a maior retenção por meio de partição hidrofóbica.

Conclusões

Biocarvão no solo contribui para a fertilidade e à sustentabilidade da fertilidade do solo, uma vez que melhora propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Isso porque proporciona ao solo, maior CTC (que ocorre pelo tipo de superfície encontrada no BC, com grande quantidade de compostos aromáticos) e consequentemente maior retenção de nutrientes além de ter função nos processos biogeoquímicos do solo, como as reações de adsorção de nutrientes, entre outros benefícios. Estes aspectos melhoram significativamente o crescimento, a nutrição das plantas e consequentemente, a produtividade das culturas, favorecendo os aspectos ambientais na mitigação das mudanças climáticas.

Entretanto, ainda não se sabe as quantidades ótimas de BC para o crescimento ideal das plantas, cuja quantidade deve ser determinada para cada tipo de solo e planta. Isso porque, o BC não é um produto padrão, suas características químicas, físicas e físico-químicas, variam de acordo com o processo de queima e seus desdobramentos (tipo de pirólise, temperatura, tempo de retenção, adição de oxigênio), tipo e granulometria da biomassa.

Literatura citada

ALHO, C.F.B.V., CARDOSO, A.S., ALVES, B.J.R., NOVOTNY, E.H. Biochar and soil nitrous oxide emissions. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 47, 722-725, 2012.

BALDOCK, J. A.; SMERNIK, R. J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered Pinus resinosa (Red pine) wood. Organic Geochemistry, Oxford, v. 33, n. 9, p. 1093-1109, 2002.

BRAADBAART, F.; BOON, J. J.; VELD, H., DAVID, P.; VAN BERGEN, P. F. Laboratory simulations of the transformation of peas as a result of heat treatment: Changes of the physical and chemical properties. Journal of Archaeological Science, Boston, v. 31, n. 6, p. 821-833, 2004.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The nature and properties of soils. 14. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 2008. 965 p.
BRENNAN, J. K.; BANDOSZ, T. J.; THOMSON, K. T.; GUBBINS, K. E. Water in porous carbons. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, Oxford, v. 187–188, n. 1, p. 539–568, 2001.
BRIENS, C.; PISKORZ, J.; BERRUTI, F. Biomass valorization for fuel and chemicals production - A review. **International Journal of Chemical Reactor Engineering,** v. 6, 2008 2008. ISSN 1542-6580.
BRITO, J. O. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n. 16, p. 63-70, 1978. Disponivel em: http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf. Acessado em: 21 nov. 2013.
BRODOWSKI, S. B. Origin, function, and reactivity of black carbon in the arable soil environment. 2004. 156 f. Tese Doutorado, University of Bayreuth, Bayreuth, Germany, 2004.
BROWN, R. A.; KERCHER, A. K.; NGUYEN, T. H.; NAGLE, D. C.; BALL, W. P. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. Organic Geochemistry, Oxford, v. 37, n. 3, p. 321-333, 2006.
CARVALHO, M.T.M, MAIA, A.H.N., MADARI, B.E., BASTIAANS, L., VAN OORT, L.P.A., HEINEMANN, A.B., SILVA, M.A.S., PETTER, F.A., MARIMON JR., B.H. and Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*. 5, 939–952.
CERRI, C.; CERRI, C. E. Agricultura e aquecimento global. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 40-44, 2007.
CLOUGH, T.J., BERTRAM, J.E., RAY, J.L., CONDRON, L.M., O'CALLAGHAN, M., SHERLOCK, R.R., WELLS, N.S. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil. Soil Science Society of America Journal. 74, 852-860, 2010.
COHEN-OFRI, I.; WEINER, L.; BOARETTO, E.; MINTZ, G.; WEINER, S. Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis. Journal of Archaeological Science, Boston, v. 33, n. 3, p. 428-439, 2006.
CUNHA, T. J. F. Ácidos húmicos de solos escuros da Amazônia (Terra Preta de Índio). 2005. 118 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.
CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). Acta Amazonica, Manaus, v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007.
CUNHA, T. J. F; NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; MARTIN-NETO, L.; SANTOS, G. A. CARBONO PIROGÊNICO. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1º ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009.p. 263-284.
CUNHA, T. J.F.; MARADI, B. E.; CANELLAS, L.P.; RIBEIRO, L.P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, p.85-93, 2009.
DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical Properties of Biochar. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). Biochar for Enviromental Management: Science and Technology. 1. Ed.Londres: earthscan, 2009. 416 p.
GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropic with charcoal – a review. Biology and Fertility of Soils, Berlin, v. 35, n. 4, p. 219-230. 2002.
HAMMES, K.; SCHIMIDT, M. W. I. Changes of Biochar in Soil. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). Biochar for Enviromental Management: Science and Technology. 1. Ed. earthscan, Londres, 2009. p. 261-278.
HAMMES, K.; SMERNIK, R. J.; SKJEMSTAD, J. O.; HERZOG, A.; VOGT, U. F.; SCHMIDT, M. W. I. Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (Oryza sativa) and chestnut wood (Castanea sativa) as reference materials for black carbon quantification. Organic Geochemistry, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1629-1633, 2006.
HAYASHI, J.; MIURA, K. Pyrolysis of victorian brown coal. In: Li, Chun-Zhu. Advances in the Science of Victorian Brown Coal. Amsterdam: Elsevier Science, 2004.
IPCC. INTERNATIONAL PANEL CLIMATE CHANGE. Climate change 2007: The Physical Science Bases. IPCC conference 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch. Acesso em 05/04/2010.
JUVILLAR, J. B. Tecnologia de transformação de Madeira em Carvão. **In**: Uso da madeira Para Fins Energéticos. Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, v1., p 67-82. 1980, Belo Horizonte.
KAMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro de ocupação humana pré-histórica na Amazônia. Tópicos em Ciência do Solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 4, p. 277-320. 2005.
KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J.; RIHA, S., VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. Reversibility of productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. Ecosystems, New York, v. 11, n. 5, p. 726-739. 2008.
KISHIMOTO, S.; SUGIRA, G. Charcoal as a soil condition. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCT RESEARCH INTERNATIONAL: ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, 1985, Pretoria, Proceedings...Pretoria: National Timber Research Institute, 1985, v. 5, p. 22-26.
KUHLBUSCH, T. A. J.; CRUTZEN, P. J. Toward a global estimate of black carbon in residues of vegetation fires representing a sink for aTerra Mulataospheric CO_2 and a source of O_2. Global Biogeochemical Cycles, Washington, v. 9, n. 4, p. 491-501, 1995.
LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Netherlands , v. 11, n. 2, p. 403–427, 2006.
LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Enviromental Management: An Introduction. In: LEHMANN, J.; SOSEPH, S. (ed). Biochar for Enviromental Management: Science and Technology. 1. Ed. earthscan, Londres, 2009. p. 4-18.
LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J., O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 70, n. 3, p. 1719-1730, 2006.
LIMA, L.B., 2014. Desempenho agronômico da soja, fertilidade e dinâmica da matéria orgânica em solo sob aplicação de biochar no cerrado brasileiro (in portuguese).Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
MACHADO, D.M. Indicadores biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolo sob aplicação de biomassa carbonizada no leste de Mato Grosso. Bom Jesus: UFPI, 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. Comunicado Técnico 125. Goiânia, GO. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. 2006. 4 p.
MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E. N.; Woods, W. I. As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1º. ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. 2009. p. 172-188.
MOURA, A. P.; CAMPOS, J. E.; MAGALHÃES, S. R. Melhoria da qualidade de serviço na produção de carvão no setor de carbonização: um estudo de caso. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v.8, p.19-26, 2010.
NEVES, E. G.; PETERSEN, J. B.; BARTONE, R. N.; SILVA, C. A. D. Historical and socio-cultural origins of Amazonian Dark Earths. In LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (eds) Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003. p. 29-50.
PACHECO, L.P.; PETTER, F.A. Benefits of Cover Crops in Soybean Plantation In: Brazilian Cerrados. In: TZI BUN NG (Ed). Soybean – Applications and Technology, 2011. p. 67-94.
PASTOR-VILLEGAS, J.; PASTOR-VALLE, J. F.; MENESES RODRÍGUEZ, J. M.; GARCÍA, M. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon Adsorbents. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Amsterdam, v. 76, n. 1-2, p. 103-108, 2006.
PEACOCKE, C.; JOSEPH, S. **Notes on Terminology and Technology in Thermal Conversion**. [s.l.]: [s.n.], [200-?]. Disponível em: <http://www.carbon-negative.us/docs/IBI_Terminology.pdf>.
PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Documento técnico 38, Colombo – PR. 2000. Disponível em: <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc38.pdf>. Acessado em: 11 nov. 2013.
PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E. P. E. Holocene fire and vegetation changes in southeasterm Brazil as deduced from fóssil charcoal and soil carbon isotopes. Quaternary International, Oxford, v. 114, n. 1, p. 35-43. 2004.
PETTER, F. A. Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado. Goiânia: UFG, 2010. 130 p. Tese (Doutorado em Agronomia).
PETTER, F. A.; MADARI, B. E. . Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian Cerrado soils. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Impresso), v. 16, p. 761-768, 2012.
PETTER, F.A., MADARI, B.E., CARNEIRO, M.A.C., MARIMON JR., B.H., CARVALHO, M.T.M. AND PACHECO, L.P. Soil fertility and agronomic response of rice to biochar application in the Brazilian savannah. Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 47, p.699-706, 2012.
PETTER, F.A.; LIMA, L.B.; MARIMON JÚNIOR, B.H.; MORAIS, L.A.; MARIMON, B.S. Impact of biochar on nitrous oxide emissions from upland rice. Journal of Environmental Management, vol. 169, p:27–33, 2016.
PETTER, F. A, FERREIRA, T.S.; SINHORIN, A.P.; LIMA, L.B.; ALMEIDA, F.A.; PACHECO, L.P.; SILVA, A.F. Biochar increases the sorption and reduces the potential contamination of subsurface water with diuron in sandy soil. Pedoshpere, v. 26, Prelo. 2016a.
PETTER, F. A, FERREIRA, T.S.; SINHORIN, A.P.; LIMA, L.B.; MORAIS, L.A.; PACHECO, L.P.; SILVA, A.F. Sorption and desorption of diuron in Oxisol under biochar application. Bragantia, Prelo. 2016 b.
RONDON, M. A.; MOLINA, D.; HURTADO, M.; RAMIREZ, J.; LEHMANN, J.; MAJOR, J.; AMEZQUITA, E. 'Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils. In: 18th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 18., Philadelphia, Pennsylvania. Resumos…2006. p. 138.
SATO, C. E.; AZEVEDO, E. M. Créditos de carbono no contexto da comercialização de energia elétrica. Revista Brasileira de Energia, v.14, p.9-25, 2008.
SJÖSTRÖM, E. Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. 2. ed. Academic Press, San Diego, USA. 1993. 293 p.
SOUCHIE FF, MARIMON JUNIOR BH, PETTER FA, MADARI BE, MARIMON BS, LENZA E. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima. Ciencia Florestal, v. 21, p.811–21, 2011.
STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term efects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant and Soil, The Hague, v. 291, n. 1-2, p. 275-290, 2007.

STEINER, J.; ZECH, W. TEIXEIRA, W. G. Microbial activity as soil quality indicator in annual and perennial plantations treated with charcoal, mineral or organic fertilizer in a highly weathered Amazonian upland soil. In: 18th WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE. 18., Philadelphia, Pennsylvania. Resumos…2006. p. 72.
STEVENSON, F. J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. 2. ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.
TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.4, p.609-618, 2005.
TROMPOWSKY, P. M.; BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; HOCKADAY, W. C., Hatcher, P.G. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. Organic Geochemistry, Oxford, v. 36, n. 11, p. 1480-1489, 2005.
WARDLE, D. A., NILSSON, M. C.; ZACKRISSON, O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus, Science, New York, vol. 320,n. 5876, p. 629. 2008.
ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G.X.; CUI, L.Q.; HUSSAIN, Q.; LI, L.Q.; ZHENG, J.W.; ZHENG, J.F.; ZHANG, X.H.; HAN, X.J.; YU, X.Y. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. Field Crops Research, Amsterdam, v.127, n. 2, p.153-160, 2012.